



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 駆動力を印加することにより磁性体の磁化ベクトルの方向を変化させるようにした磁化駆動方法であって、

上記駆動力を、その印加以前の始状態における上記磁性体の磁化ベクトルに対してほぼ垂直方向にパルス的に印加するようにしたことを特徴とする磁化駆動方法。

【請求項2】 磁性体からなる情報担体と、上記情報担体の磁化ベクトルの方向を変化させるための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値またはそれ以上の多値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記駆動力は、その印加以前の始状態における上記情報担体の磁化ベクトルに対してほぼ垂直方向にパルス的に印加されることを特徴とする磁気機能素子。

【請求項3】 上記情報担体と上記駆動力印加手段とが基板上に一体に組み合わされて設けられ、固体素子として機能することを特徴とする請求項2記載の磁気機能素子。

【請求項4】 上記駆動力として磁気異方性を起源とする有効磁場を利用することを特徴とする請求項2記載の磁気機能素子。

【請求項5】 上記駆動力として磁気異方性を起源とする有効磁場を利用することを特徴とする請求項3記載の磁気機能素子。

【請求項6】 上記駆動力として上記情報担体に結合された別の磁性体からおよぼされる交換相互作用を起源とする有効磁場を利用することを特徴とする請求項2記載の磁気機能素子。

【請求項7】 上記駆動力として上記情報担体に結合された別の磁性体からおよぼされる交換相互作用を起源とする有効磁場を利用することを特徴とする請求項3記載の磁気機能素子。

【請求項8】 上記情報担体を構成する上記磁性体として一軸磁気異方性を有する磁性体を用い、その磁化容易軸に沿った正逆の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、磁化反転の駆動力が上記情報担体の磁化容易軸とほぼ垂直方向に印加されることを特徴とする請求項2記載の磁気機能素子。

【請求項9】 上記情報担体を構成する上記磁性体として一軸磁気異方性を有する磁性体を用い、その磁化容易軸に沿った正逆の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、磁化反転の駆動力が上記情報担体の磁化容易軸とほぼ垂直方向に印加されることを特徴とする請求項3記載の磁気機能素子。

【請求項10】 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記駆動力は、上記情報担体の上記静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向が磁化容易軸となるような磁気異方性を発生させることにより発生されることを特徴とする磁気機能素子。

【請求項11】 上記駆動力を印加することにより発生される上記磁気異方性は応力誘起磁気異方性であることを特徴とする請求項10記載の磁気機能素子。

【請求項12】 上記情報担体は歪みによって敏感に磁気異方性が変化する磁性薄膜からなり、この磁性薄膜と圧電体層とが積層された構造を有し、上記圧電体層の厚さ方向に電圧を印加することにより上記応力誘起磁気異方性を発生させるようにしたことを特徴とする請求項11記載の磁気機能素子。

【請求項13】 上記情報担体は歪みによって敏感に磁気異方性が変化する磁性薄膜からなり、この磁性薄膜と歪み付与層とが積層された構造を有し、上記歪み付与層にその面内の所定の方向に一軸性の歪みを与えることによりこの方向が磁化容易軸となるような上記応力誘起磁気異方性を発生させるようにしたことを特徴とする請求項11記載の磁気機能素子。

【請求項14】 上記情報担体は上記静状態の磁化容易軸をその面に垂直方向に有する垂直磁化膜からなり、上記駆動力が上記情報担体の面にほぼ平行方向に印加されることを特徴とする請求項10記載の磁気機能素子。

【請求項15】 上記情報担体の最大辺の寸法が500nm以下であることを特徴とする請求項10記載の磁気機能素子。

【請求項16】 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、

上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記駆動力は、上記情報担体に隣接して設けられた別の磁性体からの交換相互作用により発生されることを特徴とする磁気機能素子。

【請求項17】 上記情報担体は上記静状態の磁化容易軸をその面内に有する薄膜または平板状の磁性体からなり、上記駆動力が上記情報担体の面にほぼ垂直方向に印加されることを特徴とする請求項16記載の磁気機能素子。

【請求項18】 上記情報担体を構成する被制御磁性層と固定磁化層とが中間層を介して積層された構造を有し、上記中間層の働きにより上記被制御磁性層と上記固定磁化層との間の交換相互作用の強さを変化させるようにしたことを特徴とする請求項17記載の磁気機能素子。

子。

【請求項19】 上記情報担体は上記静状態の磁化容易軸をその面に垂直方向に有する垂直磁化膜からなり、上記駆動力が上記情報担体の面にほぼ平行方向に印加されることを特徴とする請求項16記載の磁気機能素子。

【請求項20】 上記情報担体を構成する上記垂直磁化膜からなる被制御磁性層と固定磁化層とが結合制御層を介して積層された構造を有し、上記結合制御層の働きにより上記被制御磁性層と上記固定磁化層との間の交換相互作用の強さを変化させるようにしたことを特徴とする請求項16記載の磁気機能素子。

【請求項21】 上記情報担体の最大辺の寸法が500nm以下であることを特徴とする請求項16記載の磁気機能素子。

【請求項22】 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、  
上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記駆動力は、上記情報担体の外部から印加される磁場であることを特徴とする磁気機能素子。

【請求項23】 上記情報担体の最大辺の寸法が500nm以下であることを特徴とする請求項19記載の磁気機能素子。

【請求項24】 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、

上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記情報担体は、2層以上の磁性体層が積層された複合構造を有することを特徴とする磁気機能素子。

【請求項25】 上記情報担体を構成する上記2層以上の磁性体層はその面にほぼ垂直方向に磁化容易軸を有する磁性体層を含むことを特徴とする請求項24記載の磁気機能素子。

【請求項26】 上記情報担体を構成する上記2層以上の磁性体層は、異方性付与層と歪みによって敏感に磁気異方性が変化する磁性薄膜とからなることを特徴とする請求項24記載の磁気機能素子。

【請求項27】 上記情報担体は、歪み付与層と上記磁性薄膜と上記異方性付与層とが順次積層された構造を有することを特徴とする請求項26記載の磁気機能素子。

【請求項28】 上記情報担体は、上記磁性薄膜と上記異方性付与層と結合制御層と固定磁化層とが順次積層さ

れた構造を有することを特徴とする請求項26記載の磁気機能素子。

【請求項29】 上記情報担体は、歪み付与層と上記磁性薄膜と上記異方性付与層と結合制御層と固定磁化層とが順次積層された構造を有することを特徴とする請求項26記載の磁気機能素子。

【請求項30】 上記情報担体の最大辺の寸法が500nm以下であることを特徴とする請求項24記載の磁気機能素子。

【請求項31】 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、

上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記情報担体の静状態の磁化ベクトルが上記静状態の磁化容易軸に対して所定の角度傾斜していることを特徴とする磁気機能素子。

【請求項32】 A. 磁性体からなる情報担体と、  
上記情報担体の磁化ベクトルの方向を変化させるための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値またはそれ以上の多値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記駆動力は、その印加以前の始状態における上記情報担体の磁化ベクトルに対してほぼ垂直方向にパルス的に印加される磁気機能素子と、

B. ホール効果または磁気抵抗効果により上記磁気機能素子の上記情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置。

【請求項33】 A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、

上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記駆動力は、上記情報担体の上記静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向が磁化容易軸となるような磁気異方性を発生させることにより発生される磁気機能素子と、

B. ホール効果または磁気抵抗効果により上記磁気機能素子の上記情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置。

【請求項34】 A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、

上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有

し、  
上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記駆動力は、上記情報担体に隣接して設けられた別の磁性体からの交換相互作用により発生される磁気機能素子と、

B. ホール効果または磁気抵抗効果により上記磁気機能素子の上記情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置。

【請求項35】 A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、

上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記駆動力は、上記情報担体の外部から印加される磁場である磁気機能素子と、

B. ホール効果または磁気抵抗効果により上記磁気機能素子の上記情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置。

【請求項36】 A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、

上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記情報担体は、2層以上の磁性体層が積層された複合構造を有する磁気機能素子と、

B. ホール効果または磁気抵抗効果により上記磁気機能素子の上記情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置。

【請求項37】 A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、上記情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を上記情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、

上記情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、

上記情報担体の静状態の磁化ベクトルが上記静状態の磁化容易軸に対して所定の角度傾斜している磁気機能素子と、

B. ホール効果または磁気抵抗効果により上記磁気機能素子の上記情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、磁化駆動方法、磁気機能素子および磁気装置に関し、例えば、固体磁気メモリに適用して好適なものである。

【0002】

【従来の技術】磁性体を利用した素子は、半導体デバイスと比較していくつかの点で魅力を持っている。第1に、素子の要素材料として金属を利用することができるため、金属の高いキャリア密度および低い抵抗により素子の超微細化に適すると期待されることである。第2に、磁性体の磁化方向が双安定性を示すので、外部からエネルギーを供給しなくても磁化状態を保ち、不揮発性メモリ機能の実現に適することである。第3に、外部から十分な強さの磁場が印加されれば、磁化方向は1 ns程度のごく短い時間で磁場方向に向きを変えるため、非常に速い切り換え (switching) を行うことができることである。

【0003】これらの特長を生かすことによって、省電力で高速動作する、高集積度の固体メモリなどへの応用が期待されている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、素子の微細化が進むと、上記の高速動作という利点を損なう状況が生じてくることがわかった。

【0005】ひとつは、本願出願人が先に出願した特願平10-130711号で論じたように、素子の微細化により配線が細くなると、流せる電流が制限され、十分な強さの磁場を発生させることができなくなることである。強い磁場を印加するほど磁化スイッチングは速くなるから、印加磁場の上限は素子の動作速度を制限するものである。

【0006】また、磁化方向がスイッチされる側の磁性体寸法が小さくなると、その磁化ベクトルの運動において、減衰(damping)が小さくなりすぎる。この傾向が強まると、磁化ベクトルは磁場方向を軸としてその周りを周回し続けて、磁場の方向に落ち着くまでに長い時間を要するようになる。

【0007】磁性体寸法が小さくなると磁化ベクトルの運動に対する制動が小さくなる理由を補足しておく。MRAM (magnetic random access memory) など固体磁気メモリに用いられる金属磁性薄膜では、磁化の運動に伴って、それを妨げる向きに渦電流(eddy current)が流れる。この渦電流により発生するジュール熱が損失の主要な部分である。体積あたりの渦電流損失の大きさ(eddy current loss density)、 $p$  ( $W/m^3$ ) は、およそ磁性体試料の断面積に比例する。したがって、試料寸法が小さくなるに伴って、制動の強さは寸法のほぼ自乗で小さくなるのである。

【0008】したがって、この発明の目的は、磁性体の寸法がサブミクロン領域に微細化されても、高速度の磁化スイッチングが可能な磁化駆動方法、磁気機能素子お

よびそのような磁気機能素子を用いた磁気装置を提供することにある。

【0009】

【課題を解決するための手段】まず、磁化ベクトルの運動に関する一般論について説明する。

$$d\mathbf{M}/dt = -\gamma \cdot (\mathbf{M} \times \mathbf{H}) - (\alpha \cdot \gamma / M_s) \cdot \{\mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H})\} \quad \dots (1)$$

【0012】ここに、 $\mathbf{M}$ は磁化ベクトル、 $\mathbf{H}$ は磁場のベクトルである。また、 $\gamma$ はジャイロ磁気定数 (gyromagnetic constant)、 $\alpha$ は制動係数 (damping factor) である。 $\alpha$ が1よりずっと大きいときには、磁化ベクトルは外部磁場の方向へゆっくり向かう。例えば、 $xy$ 面内ではほぼ $+x$ 方向に向いた磁化ベクトルに $-x$ 方向の磁場を印加した場合に、制動が大きければ、磁化ベクトルはゆっくり $xy$ 面内を回って磁場方向へと向かい、磁化反転が達成される。この様子を図1のAに示した。同図に示すように、磁化ベクトルを示す矢印は、初期状態の「0」から「1→2→3→4→5」の順に回って、最終的に $-x$ 方向に緩和 (relaxation) して落ち着く。

【0013】逆に $\alpha$ が1よりはるかに小さく、(1)式の第1項が支配的になる場合には、磁化ベクトルの変化 $d\mathbf{M}/dt$ は常に $\mathbf{M}$ から $\mathbf{H}$ へ向かう方向とは直角に生じる。したがって、磁化ベクトル $\mathbf{M}$ は磁場 $\mathbf{H}$ を軸として、 $\mathbf{H}$ となす角を一定に保ってその周りを回る歳差運動 (precession) を行う。

【0014】小さいながらも $\alpha$ の寄与がある場合には、 $+x$ 方向に向いた磁化ベクトルに $-x$ 方向の磁場が印加されると、磁化ベクトルは $x$ 軸を周回する歳差運動をしながら次第に $x$ 軸との開き角を増し、最終的には磁場方向へと緩和してゆく。磁化ベクトル終端が渦巻き状の軌跡を描くこの過程の途中までの軌跡を、図1のBに示した。

【0015】初期状態の磁化ベクトルとは $180^\circ$ 反対方向の磁場による磁化反転の過程は、一般に上記のふた通りの極端な態様の中間的な振る舞いになる。素子の動作速度を決めるパラメタとして、磁化反転に要する時間が重要である。制動係数 $\alpha$ が極端に大きければ、磁化ベクトルの軌跡は最短距離に近いところを通るが、その運動は遅く、反転時間は長い。逆に制動係数 $\alpha$ が極端に小さければ、磁化ベクトルは素早く運動するものの螺旋状の軌跡を描き、終状態に落ち着くまでの時間は長い。最も速やかな磁化反転は、 $\alpha = 1$ の場合に得られる。このような最速応答が得られる制動状態を、臨界制動 (critical damping) の状態と呼ぶ。

【0016】例えば、MRAMなどの磁気機能素子によく利用されるパーマロイ (Permalloy, Ni-Fe合金) では、臨界制動は試料寸法が $1\mu\text{m}$ 内外のときに実現する。したがって、今日広く開発されている $1\mu\text{m}$ 内外の寸法のMRAMは、ちょうど材料の特性を有利に活用する設計にあたっていることがわかる。しかしながら、先

【0010】磁気モーメントの運動方程式は、例えばランダウ (Landau) とリフシツ (Lifshits) によれば、次のように表される。

【0011】

【数1】

述のように制動は試料寸法の自乗にほぼ比例するので、サブミクロンの寸法でさらに微細化された素子に利用する場合には、制動不足で磁化反転速度が遅くなる困難に直面せざるを得ない。

【0017】制動不足に陥らざるを得ない微細化された磁性体を用いた素子において、速やかな磁化スイッチングは、次のような駆動によって達成される。

【0018】図1のCに示すように、初期状態として $+x$ 方向に向いた磁化ベクトル「0」に対し垂直方向 (この例では $z$ 方向とした) に磁場 (またはそれに相当する磁気異方性や交換相互作用などから生じる「実効磁場 (effective field)») を印加する。すると制動が小さいので、磁化ベクトルは磁場方向には向かわず、 $z$ 軸の周りの歳差運動を開始する。

【0019】すなわち、磁化ベクトルは図1のCの矢印「1→2→3→4→5」のように、ほぼ $xy$ 面内で回転する。この歳差運動の途中で磁化ベクトルが $-x$ 方向に近い状態、すなわち図1Cの矢印「4」の状態に達した瞬間に $z$ 方向の駆動力を切れば、磁化は $-x$ 方向に留まり、初期状態から $180^\circ$ の磁化反転が達成される。この磁化反転に要する時間は、ほぼ歳差の周期の半分である。この過程によって、制動係数 $\alpha$ が極端に小さい場合でも、何周期も歳差運動をさせる図1のBに比べて速やかな磁化反転を実現することができる。

【0020】この図1のCに示すような磁化反転の駆動法を、以下、スウィングバイ・スイッチング (Swing-by Switching) と呼ぶ。これは、磁化ベクトルが駆動力 (driving force) の方向に向けられるのではなく、駆動力の脇をすり抜けるようにして終状態へと向かう特徴を表す命名である。

【0021】次に、このスウィングバイ・スイッチングの数量的検証の結果について説明する。

【0022】スウィングバイ・スイッチングの場合の磁化反転の過程を(1)式によって数値計算し、結果を図2に示した。計算に用いた実効磁場の起源は、外部磁場だけでなく、磁性体の一軸磁気異方性と反磁場 (demagnetization field) の効果とを含めている。材料は単磁区パーマロイ薄膜を想定し、飽和磁化 (saturation magnetization)  $M_s = 800\text{emu}/\text{cm}^3$ 、一軸誘導磁気異方性 (uniaxial induced magnetic anisotropy) の磁化容易軸 (easy axis of magnetization) は $x$ 軸と一致し、異方性磁場 (anisotropy field) は $H_k = 40\text{e}$ とした。また、制動係数は $\alpha = 0.01$ とした。初期状態

の磁化ベクトルは+x方向を向き、これに+z方向に1 kOeの磁場を0.2 nsの間だけ印加した場合の運動を調べた。

【0023】図2においては、横軸に時間(ns)をとり、縦軸には磁化ベクトルの方向を+x方向からxy面内に測った方位角(°)をとった。なお、磁化ベクトルはz軸方向の成分も持ち得るが、薄膜試料では磁化が膜面に垂直なz方向に立ち上がることが反磁場に妨げられる(この試料では、反磁場は10 kOe相当)ため、この成分は常に小さい。このため、ここではこの成分については考慮しない。

【0024】図2に示すように、磁化ベクトルの方位角は磁場印加後ただちに直線的な増加を示し、0.2 ns後には160°を超えた。ここで磁場の印加がなくなると、磁化ベクトルは異方性磁場と反磁場の影響下に置かれる。すなわち、実効磁場の方向が外部磁場印加中とは変わるので、歳差の軸もその瞬間に変わり、方位角の変化率も不連続な振る舞いを示している。しかし、磁化はすでに初期状態から90°以上離れて-x方向の磁化容易軸の「引力圏」にある(be within range of attractive force towards easy axis of magnetization, -x)ので、振動しながら180°方向へと緩和・収束してゆく。終状態への駆動は最初のわずか0.2 nsで完了していることがわかる。

【0025】比較例として、初期状態で+x方向にある磁化ベクトルに対し、-x方向に50eの磁場を印加し続けた場合の計算結果を図3に示す。図3では、磁化ベクトルが+x方向を離れるまでに長い時間がかかるのが特徴である。

【0026】磁化ベクトルの方向を例えば90°とか180°とか変化させる機能を、磁化スイッチング機能と呼ぶことにする。この機能は、さらに別種の機能と組み合わせることでさまざまな働きをする素子を作ることができる。例えば、スピンバルブ構造との複合化により、磁化スイッチング機能により書き込み、スピンバルブで磁化状態を読み出すメモリへの応用例である。また、同様な構成で出力回路の電流を制御することができるので、トランジスタに代わるスイッチング素子や、さらにその組合せによる論理素子への応用も可能である。

【0027】一斉回転する磁化ベクトルの歳差と緩和の一般論については、S.Chikazumi, Physics of Ferromagnetism, (John Wiley & Sons, Inc., 1964)に記述がある。

【0028】関連技術分野の先行する文献には、以下のようなものがある。

【0029】一軸異方性磁性薄膜の磁化スイッチングに関して、特に磁化容易軸と垂直方向の磁場成分がある場合にスイッチング速度が速くなることは、桜井良文編「磁性薄膜工学」(丸善1977)の4.2.2節ならびに、そこに引用された論文D.O.Smith, J. Appl. Phys. 29, 264(1958)において早くも指摘されている。

【0030】また、磁化容易軸方向に向いた磁化ベクトルに逆方向の磁場を印加して磁化反転を起こす際に、磁化容易軸と垂直方向に小さなバイアス磁場を追加することによって磁化反転の立ち上がりを効果的に加速することができることが、最近発表された(R.L.Stamps, and B.Hillebrands, Appl. Phys. Lett. 75, 1143(1999))。これも、上記のD.O.Smithの論文と共通する内容を扱っているものである。

【0031】近年の論文では、垂直磁化膜を高速のパルス電子ビームで貫くときにビームの周りに同心円状に発生する磁束を用い(垂直の磁化容易軸と面内の磁場との組み合わせ)、薄膜面内向きのこの磁場で磁化反転を起こした実験がある(C.H.Back, D.Weller, J.Heidmann, D.Mauri, D.Guarisco, E.L.Garwin, and H.C.Siegmann, Phys. Rev. Lett. 81, 3251(1998))。

【0032】さて、以上のように、磁化ベクトルに垂直な方向の磁場が磁化反転に対して持つ影響は、自然現象として古くから研究されている。

【0033】しかし、上記のD.O.Smithの論文や桜井の教科書、またR.L.Stamps, and B.Hillebrandsの論文で扱われた場合は、主たる磁場成分は初期状態の磁化ベクトルの反対方向を向いたものであった。磁化ベクトルに垂直な磁場成分は大きさも小さく、補助的な役割りのもので、この発明のように磁化反転の主たる駆動力として用いられたり、用いる可能性が意識されたものではなかった。

【0034】上記のC.H.Back, et.al.の報告は、磁化方向に垂直なパルスの磁場によって磁化反転が生じることを実験的に示したものであるが、彼らの実験は真空中に置いた磁性薄膜を電子ビームで貫くという大げさな道具立てでなされたもので、今日の磁気記録の主流であるハードディスク・ドライブや、さらに小型化された固体磁気メモリ(Solid-State Magnetic Memory)など、実用的な情報記憶装置への応用には言及していない。また、そこに開示された配置も、垂直磁化膜に薄膜面内方向の磁場を印加する場合に限定されている。

【0035】上記課題を解決するために、この発明の第1の発明は、駆動力を印加することにより磁性体の磁化ベクトルの方向を変化させるようにした磁化駆動方法であって、駆動力を、その印加以前の始状態における磁性体の磁化ベクトルに対してほぼ垂直方向にパルス的に印加するようにしたことを特徴とするものである。

【0036】この発明の第2の発明は、磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を変化させるための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値またはそれ以上の多値の情報扱う磁気機能素子であって、駆動力は、その印加以前の始状態における情報担体の磁化ベクトルに対してほぼ垂直方向にパルス的に印加されることを特徴とするものである。

【0037】この第2の発明においては、例えば、情報



担体と駆動力印加手段とが基板上に一体に組み合わされて設けられ、固体素子として機能する。磁化ベクトルの方向を変化させる駆動力としては、磁気異方性を起源とする有効磁場、情報担体に結合された別の磁性体からおよばされる交換相互作用を起源とする有効磁場などを用いることができる。また、例えば、情報担体を構成する磁性体として一軸磁気異方性を有する磁性体を用い、その磁化容易軸に沿った正逆の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、磁化反転の駆動力が情報担体の磁化容易軸とほぼ垂直方向に印加されるものであってもよい。

【0038】この発明の第3の発明は、一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、駆動力は、情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向が磁化容易軸となるような磁気異方性を発生させることにより発生されることを特徴とするものである。

【0039】この第3の発明においては、例えば、駆動力を印加することにより発生される磁気異方性は応力誘起磁気異方性である。具体的には、例えば、情報担体は歪み（あるいは応力）によって敏感に磁気異方性が変化する磁性薄膜からなり、この磁性薄膜と圧電体層とが積層された構造を有し、圧電体層の厚さ方向に電圧を印加することにより応力誘起磁気異方性を発生させる。あるいは、情報担体は歪みによって敏感に磁気異方性が変化する磁性薄膜からなり、この磁性薄膜と歪み付与層とが積層された構造を有し、歪み付与層にその面内の所定の方向に一軸性の歪みを与えることによりこの方向が磁化容易軸となるような応力誘起磁気異方性を発生させる。さらに、例えば、情報担体は静状態の磁化容易軸をその面に垂直方向に有する垂直磁化膜からなり、駆動力が情報担体の面にほぼ平行方向に印加される。なお、応力誘起磁気異方性を発生させるために用いる歪みは、上記のような一軸性の歪みに限られるものではない。例えば、面内等方的な歪みであってもよい。

【0040】この発明の第4の発明は、一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、駆動力は、情報担体に隣接して設けられた別の磁性体からの交換相互作用により発生されることを特徴とするものである。

【0041】この第4の発明においては、例えば、情報担体は静状態の磁化容易軸をその面内に有する薄膜または平板状の磁性体からなり、駆動力が情報担体の面にほ

ぼ垂直方向に印加される。具体的には、例えば、情報担体を構成する被制御磁性層と固定磁化層とが中間層を介して積層された構造を有し、中間層の働きにより被制御磁性層と固定磁化層との間の交換相互作用の強さを変化させる。あるいは、例えば、情報担体は静状態の磁化容易軸をその面に垂直方向に有する垂直磁化膜からなり、駆動力が情報担体の面にほぼ平行方向に印加される。さらに、例えば、情報担体を構成する垂直磁化膜からなる被制御磁性層と固定磁化層とが結合制御層を介して積層された構造を有し、結合制御層の働きにより被制御磁性層と固定磁化層との間の交換相互作用の強さを変化させるようにしてもよい。

【0042】この発明の第5の発明は、一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、駆動力は、情報担体の外部から印加される磁場であることを特徴とするものである。

【0043】この発明の第6の発明は、一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、情報担体は、2層以上の磁性体層が積層された複合構造を有することを特徴とするものである。

【0044】この第6の発明においては、例えば、情報担体を構成する2層以上の磁性体層はその面にほぼ垂直方向に磁化容易軸を有する磁性体層を含む。また、具体的には、情報担体を構成する2層以上の磁性体層は、異方性付与層と歪みによって敏感に磁気異方性が変化する磁性薄膜とからなる。あるいは、例えば、情報担体は、歪み付与層と磁性薄膜と異方性付与層とが順次積層された構造を有する。さらに、例えば、情報担体は、磁性薄膜と異方性付与層と結合制御層と固定磁化層とが順次積層された構造を有する。また、例えば、情報担体は、歪み付与層と磁性薄膜と上記異方性付与層と結合制御層と固定磁化層とが順次積層された構造を有する。

【0045】この発明の第7の発明は、一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、情報担体の静状態の磁化ベクトルが静状態の磁化容易軸に対して所定の角度傾斜していることを特徴とするものである。

【0046】この発明の第8の発明は、A. 磁性体から

なる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を変化させるための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値またはそれ以上の多値の情報を扱う磁気機能素子であって、駆動力は、その印加以前の始状態における情報担体の磁化ベクトルに対してほぼ垂直方向にパルス的に印加される磁気機能素子と、B. ホール効果または磁気抵抗効果により磁気機能素子の情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置である。

【0047】この発明の第9の発明は、A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、駆動力は、情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向が磁化容易軸となるような磁気異方性を発生させることにより発生される磁気機能素子と、B. ホール効果または磁気抵抗効果により磁気機能素子の情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置である。

【0048】この発明の第10の発明は、A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、駆動力は、情報担体に隣接して設けられた別の磁性体からの交換相互作用により発生される磁気機能素子と、B. ホール効果または磁気抵抗効果により磁気機能素子の情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置である。

【0049】この発明の第11の発明は、A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、駆動力は、情報担体の外部から印加される磁場である磁気機能素子と、B. ホール効果または磁気抵抗効果により磁気機能素子の情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置である。

【0050】この発明の第12の発明は、A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、情報担体は、2層以上の磁性体層が積層された複合構造を有する磁気機能素子と、B. ホール効果または磁気抵

抗効果により磁気機能素子の情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置である。

【0051】この発明の第13の発明は、A. 一軸磁気異方性を有する磁性体からなる情報担体と、情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるための駆動力を情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加するための駆動力印加手段とを有し、情報担体の磁化方向によって2値の情報を扱う磁気機能素子であって、情報担体の静状態の磁化ベクトルが静状態の磁化容易軸に対して所定の角度傾斜している磁気機能素子と、B. ホール効果または磁気抵抗効果により磁気機能素子の情報担体の磁化方向を読み出す手段とを有することを特徴とする磁気装置である。

【0052】これらの磁気装置には、磁気記憶装置、電流スイッチング素子、電圧スイッチング素子、論理素子、さらには磁気ベースのコンピュータなどの各種の機能装置が含まれる。

【0053】この発明において、磁性体または情報担体の大きさは必要に応じて決定されるものであるが、特に磁気機能素子の微細化を図る場合には、その最大辺の長さはサブミクロン領域、具体的には例えば500nm以下に選ばれる。

【0054】この発明による磁気機能素子は、磁気記憶装置への応用に限らず、その磁化スイッチングを利用する各種の装置、例えば電流制御素子などに応用することが可能である。

【0055】上述のように構成されたこの発明においては、磁気異方性や交換相互作用などの各種の起源により発生される駆動力を、磁性体または情報担体の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加することにより磁性体または情報担体の磁化ベクトルの方向を反転させるので、すなわち、スウィングバイ・スイッチングを行うので、磁性体または情報担体の寸法、特にその最大辺の寸法がサブミクロン領域に微細化されても、磁化ベクトルの制動不足に妨げられることなく、その駆動力の印加後瞬時に磁化ベクトルの顕著な変位が始動し、無駄な軌跡を描かずに磁化ベクトルの方向を反転させることができ、高速でスウィングバイ・スイッチングを行うことができる。

【0056】

【発明の実施の形態】以下、この発明の実施形態について図面を参照しながら説明する。

【0057】図4はこの発明の第1の実施形態による磁化スイッチ素子を示す。この磁化スイッチ素子は、静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向が磁化容易軸となる磁歪誘起磁気異方性を利用するものである。

【0058】図4に示すように、この磁化スイッチ素子は、電極層1、圧電体層2および情報担体としての、歪みによって敏感に磁気異方性が変化するような磁歪(magnetostriiction)の大きな材料からなる歪み敏感磁性性薄



膜3が順次積層された構造を有する。これらの電極層1、圧電体層2および歪み敏感磁性薄膜3はそれぞれ円形の形状を有し、全体として円柱形状を有する。歪み敏感磁性薄膜3は電極層を兼用する。

【0059】圧電体層2の材料としては、例えば、PZT、PLZT、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ 、ADP、KDP、ZnOなどを用いることができる。圧電体層2を基板上に形成する場合、圧電体層/基板または圧電体層/下地薄膜/基板の組み合わせとして下記のようなものを用いることができる。

【0060】PZT/ $\text{SrTiO}_3$ 、PZT/Pt/MgO、PZT/ $\text{CeO}_2$ /Si  
PLZT/ $\text{SrTiO}_3$ 、PLZT/Pt/MgO、PLZT/ $\text{CeO}_2$ /Si  
BaTiO<sub>3</sub>/Pt/MgO、BaTiO<sub>3</sub>/ $\text{CeO}_2$ /Si  
LiNbO<sub>3</sub>/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、LiNbO<sub>3</sub>/ $\text{SrTiO}_3$ 、LiNbO<sub>3</sub>/ $\text{CeO}_2$ /Si  
LiTaO<sub>3</sub>/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、LiTaO<sub>3</sub>/ $\text{SrTiO}_3$ 、LiTaO<sub>3</sub>/ $\text{CeO}_2$ /Si  
ZnO/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、ZnO/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Si

磁歪の絶対値が大きな値を持つ歪み敏感磁性薄膜3の材料としては、下記のようなものを用いることができる。

【0061】1. 希土類+Fe、Co、Niの合金  
TbFe<sub>2</sub>、Tb<sub>70</sub>Fe<sub>30</sub>、Tb<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>、Tb(CoFe)<sub>2</sub>、Tb(NiFe)<sub>2</sub>、SmFe、ErFe<sub>2</sub>、SmFe<sub>3</sub>など。これらは磁歪の絶対値が特に大きい。

【0062】2. 白金族+Fe、Co、Niの合金  
Fe<sub>70</sub>Pd<sub>30</sub>、Fe<sub>50</sub>Rh<sub>50</sub>、Co-Pdなど。これらは金属のなかでは、耐食性に優れ、靱性も高い。

【0063】3. 酸化物  
コフェライト、Niフェライト、Baフェライト、希土類鉄ガーネットなど、ならびにこれらを主成分とする固溶体。これらは耐食性に優れるが、結晶の作製がやや難。

【0064】4. その他、Fe、Co、Ni、Mnなどの合金。

【0065】Fe<sub>49</sub>Co<sub>49</sub>V<sub>2</sub>、Co-Ni、Fe-Al、Mn-Biなど。これらは酸化物よりも作製が容易である。

【0066】この磁化スイッチ素子の具体的な構造の一例を挙げると、圧電体層2として厚さ200nmのLiNbO<sub>3</sub>層を用い、歪み敏感磁性薄膜3として厚さ20nmのFe-Rh合金膜を用い、これらを直径500nmの円形に加工したものである。

【0067】次に、この磁化スイッチ素子の動作について説明する。図4に示すように、電極層1と電極層を兼用する歪み敏感磁性薄膜3との間に駆動回路を接続し、この駆動回路によって電圧をパルス的に印加すると、圧

電体層2は電場の方向(z方向)に、例えば収縮する。この圧電体層2を構成する圧電体結晶がz軸の周りに3回対称以上の高次の対称性を持てば、この収縮に伴って、圧電体層2の面内(xy面内)方向には等方的な伸展の歪みが生じる。そして、この圧電体層2上に積層された歪み敏感磁性薄膜3には、面内等方的な引っ張り歪みが与えられる。歪み敏感磁性薄膜3の磁歪が負の大きな値を持てば、この状況下では膜面に垂直方向が磁化容易軸となるような応力誘起磁気異方性(stress-induced magnetic anisotropy)を生じる。こうして生じた垂直磁気異方性(perpendicular anisotropy)は磁化ベクトルを+zまたは-z方向へ向けようとする作用を持つので、実効磁場の起源として寄与し、スウィングバイ・スイッチングの駆動力となる。

【0068】(1)式に記述される通り、磁化ベクトルの変化は $-(M \times H)$ に比例する。したがって、もし初期状態の磁化ベクトルのz成分が正であれば、図5に示すように手前側へ歳差を開始する。また、このz成分が負であれば逆回りとなる。磁化ベクトルが完全にxy面内にある場合には、垂直磁気異方性による実効磁場は働かない。この場合は、熱揺らぎなどによってz成分が生じてから、初めて駆動を受けることになる。したがって、磁気異方性を駆動力に用いる場合には、磁化方向と磁化容易軸とは完全に垂直でなく、適度に実効磁場が生じるような角度にして用いるのが速いスイッチングに有効である。これを実現するためには、あらかじめ駆動回路にバイアス電圧を加え、垂直磁気異方性のオフセットを与えておく方法がある。また、素子の製造工程で歪み敏感磁性薄膜3に生じる応力や、歪み敏感磁性薄膜3の結晶磁気異方性などを援用することもできるのは言うまでもない。

【0069】磁化ベクトルが所期の終状態(図5では $t=t_3$ の状態)の近くにある時に駆動回路からの電圧を切り、磁化ベクトルを-x方向に落ち着かせて磁化反転が終了する。再度+x方向への磁化反転を行うためには、同じパルス電圧を印加すればよい。

【0070】ここに示した、歪みまたは応力によって誘起される磁気異方性を駆動力として磁化ベクトルの方向をスイッチする方法とそれを利用した機能素子の例は、本願出願人が先に出願した特願平11-200840号に開示されている。一方向の歪みのON/OFFないし符号(引っ張りか圧縮か)を変えることによって、磁化容易軸の方向が90°変化するだけなので、磁化ベクトルのスイッチングは0°と90°との間で行われるのが自然であった。上記の特願平11-200840号に開示されたような工夫によって、0°、90°、180°、270°の4方向に磁化ベクトルを向ける多値記憶も可能である。しかしながら、どちらの場合も90°ずつ異なる方向の磁化ベクトルがいずれも安定に保持されるため、4回対称の磁気異方性(magnetic anisotropy

with 4-fold symmetry) を作り込むという、材料技術上難度の高い工程が不可欠であった。これに対し、この発明のスウィングバイ・スイッチングならば、 $90^\circ$  方向の駆動でも  $0^\circ$  と  $180^\circ$  との間のスイッチングを達成することができる。この意味で、スウィングバイ・スイッチングは、応力（または歪み）駆動の磁気機能素子との組合せにおいて、重要な技術である。

【0071】以上のように、この第1の実施形態によれば、圧電体層2に電圧をパルス的に印加することにより歪み敏感磁性薄膜3に応力誘起磁気異方性を生じさせ、これにより生じる垂直磁気異方性を起源とする駆動力を、情報担体である歪み敏感磁性薄膜3の静状態の磁化容易軸とほぼ垂直方向にパルス的に印加することにより磁化ベクトルの方向を反転させるので、すなわち、スウィングバイ・スイッチングを行うので、歪み敏感磁性薄膜3がサブミクロン領域の寸法に微細化されても、磁化ベクトルの制動不足に妨げられることなく、高速でスウィングバイ・スイッチングを行うことができる。

【0072】次に、この発明の第2の実施形態による磁化スイッチ素子について説明する。

【0073】この第2の実施形態による磁化スイッチ素子は、第1の実施形態による磁化スイッチ素子と同様な構造を有するが、歪み敏感磁性薄膜3として歪み（応力）誘起磁気相転移を起こし得るものを用いる点で異なる。このような磁気相転移を持つ材料としては下記のようなものを用いることができる。

【0074】1. 磁気相転移を持つ金属、化合物  
Fe-Rh, Mn-Rh, Cr-S など。

【0075】2. 磁気相転移を持つ酸化物  
 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 、 $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ 、 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  などのMn系ペロブスカイト。これらの酸化物は錆びない点で有利である。

【0076】上記の材料を用いて、応力ないし歪みの付与によって第1の実施形態による磁化スイッチ素子と同様に磁化方向を変化させる機能を実現し得ることは、本出願人の特願平11-200840号に開示された通りである。

【0077】この第2の実施形態によれば、第1の実施形態と同様な利点を得ることができる。

【0078】図6はこの発明の第3の実施形態による磁化スイッチ素子を示す。この磁化スイッチ素子は、面内の磁化容易軸の変化による駆動を用いたものである。

【0079】図6に示すように、この第3の実施形態による磁化スイッチ素子においては、磁歪が大きく、歪みによって磁気異方性が顕著に変化する歪み敏感磁性薄膜11を被制御磁性層として用い、この歪み敏感磁性薄膜11とこれに歪みを与える圧電体からなる歪み付与層12とが積層されている。これらの歪み敏感磁性薄膜11および歪み付与層12はいずれも長方形の形状を有する。一方方向に長く、それと垂直方向に狭い細長い形状

は、形状異方性によって長手方向を磁化容易軸とするための手段である。しかし、磁性体端部のスピン分布は磁化反転の態様に大きな影響を持つので、これを制御する目的で厳密な長方形形状とは異なる形状を利用することができる。例えば、端部を斜めに尖らせることの結果について、A.V.Pohm, J.M. Anderson, R.S.Beech, and J.M.Daughton らによる検討結果がJournal of Applied Physics, Vol. 85, 4771(1999)に掲載されている。

【0080】歪み付与層12としては、それ自体が電圧刺激で歪みを生じるPZT、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ 、ADP、KDP、 $\text{ZnO}$ などを用いることができる。あるいは、圧電材料または電歪材料と接して応力を伝達されるように形成された、Si、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ あるいはガラスなど、より安価な基板でもよい。

【0081】磁歪の絶対値が大きな値を持つ歪み敏感磁性薄膜11の材料としては、第1の実施形態で挙げたものと同様なものを用いることができる。

【0082】この磁化スイッチ素子の歪み敏感磁性薄膜11の寸法の一例を挙げると、歪み敏感磁性薄膜11がその細長い形状によって磁化方向を保つ磁気異方性を有することができるように、 $0.2\mu\text{m} \times 0.05\mu\text{m}$ の長方形とし、厚さを20nmにしたFe-Rh薄膜やNi薄膜などである。

【0083】この磁化スイッチ素子においては、例えば、被制御磁性層である歪み敏感磁性薄膜11の磁歪が正である場合には、薄膜面内のある軸に沿った一軸性の引っ張り歪みを歪み敏感磁性薄膜11に与えると、歪みの軸に沿った方向が磁化容易軸になるような応力誘起磁気異方性が図6に示すように生じる。

【0084】この応力誘起磁気異方性を磁化ベクトルの駆動力とする概念は、本願出願人による上記の特願平11-200840号ですでに開示されたものである。それに対するこの発明の新規な利点は、(1)サブミクロン領域の寸法の超微細化素子で高速動作を実現することができることと、(2)スウィングバイ・スイッチングでは応力誘起磁気異方性を用いても $180^\circ$ の駆動ができるため、一軸磁気異方性の磁性材料を情報担体として利用することができることである。

【0085】磁化ベクトルと磁化容易軸とが完全に垂直な場合には、磁化ベクトルへのトルクは生じないことに注意を要する。したがって、このような状況を避けるために相互のなす角度が完全な垂直から外れるように調節して効果的な駆動を得る。具体的には、歪み付与層12により付与する応力の軸（これが発生する磁化容易軸の向きを決める）が、静状態の歪み敏感磁性薄膜11の磁化容易軸に対して、完全に垂直あるいは平行にならないようにすればよい。

【0086】より具体的には、例えば歪みの付与に用いる歪み付与層12に接触させる電極（図示せず）の位置・形状を変えたり、歪み付与層12を構成する圧電体の

結晶軸の向きを選ぶことにより目的を達成することができる。あるいは、異なる起源の磁気異方性（形状磁気異方性、結晶磁気異方性、磁場中熱処理による誘導磁気異方性、磁場中堆積による誘導磁気異方性など）を適宜組み合わせ、被制御磁性層である歪み敏感磁性薄膜11の磁化容易軸の角度を傾けることによって、目的を達成することができる。

【0087】この第3の実施形態によれば、第1の実施形態と同様な利点を得ることができる。

【0088】図7はこの発明の第4の実施形態による磁化スイッチ素子を示す。この磁化スイッチ素子は、スイッチしようとする磁化ベクトルに対して垂直方向に作用させる駆動力として、隣接する別の磁性体からの交換相互作用（exchange interaction）による駆動力を利用するものである。

【0089】図7に示すように、この磁化スイッチ素子は、固定磁化層21と情報担体としての被制御磁性層22とが中間層23を介して積層された構造を有する。一般に複数の磁性層を含む積層膜中では、磁性層相互の間に交換相互作用が働く。この交換相互作用の強さは、積層膜の構成要素、この例では中間層23の働きによって変化させることができる。

【0090】固定磁化層21からの交換結合を利用して被制御磁性層22の磁化方向の駆動をするために用いる構造の具体例について説明する。これについては、本願出願人が先に出願した特願平10-185255号に既に開示されている。

【0091】中間層23が半導体層である場合、磁性体に接触する半導体中のキャリアは、磁性体からの距離とともに振動的に減衰するスピン密度分布を持ち、その偏極（キャリアの平均スピンの零からのずれ）がおよぶ距離にある別の磁性イオンまたは磁性体との間に、磁気的な相互作用（RKKY相互作用）を生じる。この相互作用によって、半導体層で分けられた二つの磁性層、すなわち固定磁化層21と被制御磁性層22との間に交換結合が得られる。

【0092】この磁気的相互作用の大きさや距離に伴う振動の周期は、キャリア密度に依存する。また、半導体のキャリア密度は、電気刺激（電圧印加、電流注入など）または光照射などの外部刺激によって変えることができる。したがって、半導体層に外部刺激を与えることで、上下の磁性層の磁気的結合を変化させることができる。そこで、例えば、固定磁化層21および被制御磁性層22またはそれらとは別に設けた電極により中間層23、すなわち半導体層に印加する電圧をON/OFFすることにより、被制御磁性層22の磁化ベクトルを反転させるような駆動力を生じさせることができる。

【0093】特に、半導体層を介する磁気的結合では、スピン密度分布の振動的性質のおかげで、磁気的結合の強さのみならず、磁気的結合の符号が変わる可能性もあ

る。すなわち、半導体層を介した磁気的結合の場合には、上下の磁性層の磁化が平行（強磁性的）に揃いやすいか、反平行（反強磁性的）に揃いやすいかを、半導体層に与える外部刺激で制御することができる可能性がある。

【0094】中間層23が誘電体層である場合、誘電体層を介して、磁性層間に交換結合を持たせることもできる。このとき、磁性層間の交換結合は、磁性層間を移動するトンネル電子によって媒介される。そこで、例えば、固定磁化層21および被制御磁性層22またはそれらとは別に設けた電極から電圧を印加して、積層構造のポテンシャル分布を変えると、中間層23、すなわち誘電体層を透過する電子のトンネル確率が変わり、固定磁化層21と被制御磁性層22との間の交換結合が変化する。これを被制御磁性層22の磁化方向を反転させる駆動力とすることができる。

【0095】なお、中間層23として複数層の誘電体層を形成した場合には、複数のポテンシャル障壁を持つ構造となる。これらの複数のポテンシャル障壁を持つ構造を電子が透過する確率は、障壁の間に作られるポテンシャル井戸を共鳴的に透過するエネルギーを電子が持つ場合に、著しい極大を示す。この共鳴と非共鳴との間で、電子のエネルギーまたは構造のポテンシャル分布を変化させると、外部からの比較的小さな電気刺激によって、大きなトンネル確率の変化を起こすことができ、その結果、トンネル電子による交換結合に大きな変化を起こすことができる。

【0096】中間層23が導電体層である場合、非磁性金属などからなる導電体層においてもRKKY相互作用は共通にあり、これを介して磁性層間に磁気的結合を得ることができる。もっとも、導電体はキャリア数が多くかつ緩和時間も短いので、半導体におけるように外部刺激によってキャリア数を変えることは容易でなく、したがって、磁気結合の変調も困難である。しかしながら、材料の構造を工夫することによって、磁気結合の変調を実現することができる。

【0097】例えば、中間層23としてCr/Fe-Agの積層膜を用い、このCr/Fe-Agの積層膜に電流を供給することで、固定磁化層21と被制御磁性層22との間の磁気結合を切ることができる。このように電流で制御される方式は、電気容量によって動作速度を制限されることがなく、高耐圧の絶縁材料が不要であるなどの利点を有する。

【0098】中間層23が複合材料からなる層である場合、単相の材料ではなく、複合材料を、固定磁化層21と被制御磁性層22との間の磁気的結合を制御する中間層23に用いても、磁気結合を伝搬し、かつこの結合の強さを外部刺激によって変化させる制御が可能となる。

【0099】具体的には、中間層23として、例えば、

磁性層と非強磁性層とが積層された多層構造のものをを用いることができる。磁性層としては、例えば、Fe、Co、Niなどの強磁性金属またはそれらを非磁性金属で希釈した合金などを用いることができる。また、非強磁性層としては、Ti、V、Mn、Cu、Zr、Nb、Mo、Ru、Rh、Pd、Ag、Hf、Ta、W、Re、Ir、Pt、Auなど、ほとんどの金属を用いることができる。なお、室温でそれ自身が反強磁性であるCrなども、非強磁性層に用いることができる。得られる結合が強磁性的か反強磁性的か、あるいはその強度などについては、積層の相手となる磁性体の種類や非強磁性層の厚さなどによって、様々な設計の可能性を与える。

【0100】また、中間層23としては、上記のような積層構造のほかに、微粒子分散構造を有する層を用いることもできる。具体的には、この層は、Feなどからなる強磁性微粒子が、Agなどからなる非磁性体の内部に分散した構造である。このとき、磁氣的結合は、強磁性微粒子を飛び石のように伝わり、その結果、固定磁化層21と被制御磁化層22とが磁氣的に結合することとなる。

【0101】このとき、強磁性微粒子間の磁氣的結合は非常に弱く、この磁氣的結合は、電流が流れると過剰な電子散乱や温度上昇などによって分断されやすい。すなわち、微粒子分散構造の中間層23の場合、その上下に設けられた固定磁化層21と被制御磁性層22との間の磁氣的結合は、強磁性微粒子間の微弱な磁氣的結合に依存しており、中間層23に流れる電流によってマクロな磁氣的結合が分断されやすい。

【0102】なお、このような微粒子分散構造は、積層構造の一要素として用いることもできる。例えば、上記にCr膜との積層構造として現れたFe-Ag膜は、非固溶の2相混合系材料からなるので、正確には、微粒子分散構造になっているとも言える。

【0103】また、中間層23に、磁性体を含有する複合材料を用いる場合には、複合材料中の磁性体を媒介として磁氣的結合が間接的に生じるので、中間層23の厚さを比較的に厚くすることができる。そこで、中間層23に、磁性体を含有する複合材料を用いる場合には、その厚さは10nm以上とすることが好ましい。厚さが10nm以上であれば、中間層23の厚さが薄すぎるために製造が困難であるという問題などを回避することができる。

【0104】なお、磁性体を含有する複合材料からなる中間層23の厚さの上限は特に規定されるものではないが、実際の製造プロセスなどを考慮すると、この中間層23の厚さは1μm程度以下とすることが望ましい。

【0105】中間層23が別種の磁性体からなる場合、磁気秩序が消失するキュリー温度が比較的低い材料や、補償点付近の状態にあるフェリ磁性体も、外部刺激でマクロな磁気特性を顕著に変える。これを、磁性層間、す

なわち固定磁化層21と被制御磁性層22との間の磁氣的結合の変調に利用することも可能である。

【0106】次に、この第4の実施形態による磁化スイッチ素子の製造方法の一例について説明する。ここでは、中間層23が導電体層である場合について説明する。

【0107】まず、例えばガラス基板上に例えばスパッタリング法により高保持力Co-Pt磁性層（永久磁石層）およびCo層を固定磁化層21として順次堆積する。ここで、例えば、高保持力Co-Pt磁性層の厚さは100nm、Co層の厚さは100nmとする。

【0108】次に、固定磁化層21上に例えばスパッタリング法によりCr/Fe-Ag多層膜を中間層24として堆積する。具体的には、Fe-Agモザイク・ターゲット（中心角15°の扇形Ag板6枚をFeターゲット上に並べたもの）とCrターゲットの二つを同時にスパッタしながら、基板がそれぞれのターゲット上に交互に滞在するようにして、Cr/Fe-Ag多層膜を室温で堆積した。それぞれの厚さは、Cr膜は0.9nm、Fe-Ag膜は1.5nmで、フェライト薄膜上にFe-Ag膜から堆積を開始し、16周期と半分堆積してFe-Ag膜が一番上になるように終了した。すでに述べたように、このCr/Fe-Ag多層膜は、電流が流れたときに磁氣的結合が切れる作用を持つものである。実際には、この中間層24に電流供給をするための電極がとれるように、素子領域の外周部に電極パッドを形成する。

【0109】さらに、中間層23上に、中間層23から導出された電極パッドを覆わないようにして、例えばスパッタリング法により絶縁結合層を堆積する。

【0110】次に、絶縁結合層上に例えばスパッタリング法によりNi-Fe層を記憶担体である被制御磁性層22として堆積する。堆積中は基板加熱によって下地から伝搬する磁氣的バイアスを除き、外部磁界を-x方向に印加してNi-Fe層にx軸方向に容易軸を持つ一軸磁気異方性を誘導した。

【0111】この後、被制御磁性層22上に所定形状のレジストパターンを形成した後、このレジストパターンをマスクとして被制御磁性層22、中間層23および固定磁化層21をドライエッチングにより順次エッチングすることにより記憶担体の形状にパターン化する。なお、このパターン化は、いわゆるリフトオフ・プロセスを用いて行ってもよい。

【0112】この後、電磁石を用いて室温にてx方向に2kOeの磁界を印加し、高保持力Co-Pt磁性層およびCo層の磁化方向を-x方向に揃えた。

【0113】以上のようにして、目的とする磁化スイッチ素子が製造される。

【0114】この第4の実施形態は、上述の第1および第3の実施形態のように応力誘起磁気異方性を利用する

場合に比べると、外部磁場を印加した場合に似て、決まった一方向への駆動力となることが利点である。すなわち、交換相互作用のエネルギー $E_{ex}$ は $J$ を正または負の定数として $E_{ex} = J \cdot \cos(\theta - \theta_f)$ の形に書けるが、一軸磁気異方性のエネルギー $E_a$ は $K_u$ を正の定数として $E_a = -K_u \cdot \cos^2(\theta - \theta_0)$ のように余弦の2次関数になる。ここに $\theta$ は被制御磁性層の磁化ベクトルの方位角、 $\theta_f$ は固定磁化層の磁化ベクトルの方位角、 $\theta_0$ は磁化容易軸の方位角である。スウィングバイ・スイッチングでは駆動力を磁化ベクトルに垂直に近く加えるから、 $\theta - \theta_f$  または  $\theta - \theta_0$  は $90^\circ$ に近い値となる。したがって、エネルギーの勾配 $dE/d\theta$ によって与えられる磁化ベクトルへのトルクは、 $E_a = -K_u \cdot \cos^2(\theta - \theta_0)$ の磁気異方性利用の場合には極小値に近く、符号(方向)すらも一定しない可能性がある。一方、交換相互作用を利用する $E_{ex} = J \cdot \cos(\theta - \theta_f)$ の場合には、最大に近いエネルギー勾配 $dE/d\theta$ の大きさを利用することができるのが利点である。

【0115】この第4の実施形態によれば、第1の実施形態と同様な利点を得ることができる。

【0116】図8はこの発明の第5の実施形態によるMRAMを示す。このMRAMは、磁化容易軸に垂直方向の磁場で駆動するものである。

【0117】図8に示すように、このMRAMにおいては、図示省略した基板上に、縦・横の配線の組み、すなわち語線(ワード線)31および桁線(ビット線)32と、これらの配線の交差点、すなわち格子点に配置された磁性薄膜とが設けられている。そして、これらのマトリクス状に配置された磁性薄膜を記憶担体33とし、これの正逆の磁化方向を状態「0」または「1」に対応させて2値記憶を行うものである。

【0118】従来のMRAMでは、この磁化方向を反転させる「書き込み」動作には、語線と桁線とに流す電流のつくる合成磁場を用いている。すなわち、電流がONである縦線、すなわち語線と、同じく電流がONである横線、すなわち桁線との交点に位置する記憶担体だけが両方からの合成磁場を受けるので、その1個の記憶担体の磁化だけを選択的に反転させることができるというものである。

【0119】普通、長短の2辺が $1\mu\text{m}$ 内外の大きさを持つ長方形の磁性薄膜を記憶担体として用い、その形状異方性(shape anisotropy)によって一軸磁気異方性を得ている。その磁化容易軸が配線の一方(縦または横)と平行になるように置き、磁化容易軸方向にある磁化ベクトルに対しほぼ $135^\circ$ の方向に合成磁場を印加して磁化反転を駆動する場合が多い。磁化に対し $180^\circ$ の磁場によるスイッチングの場合に比べて、磁化と磁場とが角度をなす配置は、動作速度を高める上で有利であることが知られている。このように磁場によって駆動さ

れる素子においても、微細化がさらに進めば、磁化ベクトルの制動不足で磁化反転速度が劣化する。

【0120】このような磁場駆動のMRAMを高速化するために、図8に示すような配置でスウィングバイ・スイッチングを応用することができる。すなわち、磁性薄膜からなる記憶担体33の磁化容易軸を縦横の配線、すなわち語線31および桁線32とほぼ $45^\circ$ をなす方向に置き、これらの配線からの合成磁場が、記憶担体33の磁化ベクトルの方向に対しほぼ $90^\circ$ 方向に印加されるように配置すればよい。

【0121】ただし、この場合の駆動は、磁化反転に要する時間の数分の一の極めて短時間だけ持続するパルス電流による衝撃的な駆動である必要がある。理由は以下の通りである。縦または横の一方の配線だけが生じる磁場の大きさは両者の合成磁場の値に比べて小さいにもかかわらず、記憶担体33の磁化容易軸に対して $45^\circ$ または $135^\circ$ に働く。この角度の磁場はより遅い静的磁化過程の駆動力としては効果的に働くので、それがある程度以上の時間印加されると、電流を担う配線に沿って位置する全ての記憶担体33の磁化が一方向に揃えられてしまう可能性があり、選択的な書き込みができなくなるおそれがあるからである。

【0122】記憶担体33を構成する磁性薄膜の具体例を挙げると、磁場中成膜または長方形形状によって長手方向が磁化容易軸となるような磁気異方性を持たせた寸法が $0.25\mu\text{m} \times 0.1\mu\text{m}$ 、厚さが $10\text{nm}$ の $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 合金薄膜である。

【0123】この第5の実施形態によれば、第1の実施形態と同様な利点を得ることができることにより、高速動作可能なMRAMを実現することができる。

【0124】図9はこの発明の第6の実施形態による磁化スイッチ素子を示す。

【0125】スウィングバイ・スイッチングを効果的に利用するためには、素子の構成要素である各磁性層、なかでもとくにスイッチングを生じる記憶担体としての被制御磁性層は適切な磁気特性を持っていなければならない。より具体的には、磁性薄膜の飽和磁化(saturation magnetization)、磁歪(magnetostriction)、磁気異方性(magnetic anisotropy)、磁化容易軸の方向(direction of easy axis of magnetization with respect to the device structure)などが、それぞれ適切な値であることが要求される。このように多数個のパラメタが同時に所望の値を持つようにすることは、材料の組成の選択だけによっては至難である。

【0126】磁性薄膜を複数の層の複合構造で構成することによって、素子設計上要求される磁気特性を達成することができる。例えば、磁化反転の駆動力となる応力誘起磁気異方性を生じる源泉である磁歪が大きな値を持つ磁性薄膜と、磁気異方性の値が大きく磁化容易軸の方向が確定した磁性薄膜とをそれぞれ適当な厚さで積層形

成することによって、磁歪と磁気異方性を独立に制御することができる。

【0127】そこで、この第6の実施形態による磁化スイッチ素子は、そのような目的で、図9に示すように、歪み付与層41、歪み敏感磁性層42、異方性付与層43、結合制御層44および固定磁化層45が、順次積層された構造を有する。ここでは、積層構造中央部の歪み敏感磁性層42と異方性付与層43との2層の磁化が強磁性的に揃って (ferromagnetically aligned) ひとつの磁化ベクトルとなって運動し、2層ひと組みで複合被制御磁性層として動作する。

【0128】被制御磁性層に適切な磁気異方性を持たせることは、スイッチングの速さを得るためばかりでなく、静状態の磁化方向を安定に保ち不揮発性メモリ動作を実現する場合にも重要である。異方性付与層43はこのために形成されている。

【0129】歪み付与層41は、第3の実施形態における歪み付与層12と同様な働きをするものであり、これと同様な材料で形成される。また、結合制御層44は第5の実施形態における中間層23と同様な働きをするものである。

【0130】この磁化スイッチ素子においては、圧電体からなる歪み付与層12から受ける歪みが変化すると磁歪の大きな歪み敏感磁性層42の磁化方向は変化する。歪み状態がもとに戻ったときにその磁化が歪みに対して可逆に戻らず、変化の記憶を確実に保持するように、複合被制御磁性層の設計が行われている。すなわち、歪み付与層41に接して形成される被制御磁性層は、歪みを磁気特性の変化に変換する層、すなわち歪み敏感磁性層42と、磁化状態の保持・記憶を助けるために磁気異方性を付与する異方性付与層43とから成るものである。

【0131】歪み敏感磁性層42の磁気異方性は、歪み付与層41から大きな歪みを受けると変化し、それに結合した異方性付与層43の磁化も回転の駆動力を受ける。そして、歪みが小さくなれば、異方性付与層44が明確な異方性を保っているため、歪み敏感磁性層42の磁化方向もその容易軸のいずれかに保たれる。こうして、不揮発性記憶が達成される。

【0132】複合被制御磁性層の具体例を挙げると、MgO(110)基板上に成長した厚さ10nmのFe(211)薄膜を異方性付与層43とし、その上に厚さ25nmのNi層を堆積し、歪み敏感磁性層42とする。歪みは、MgO基板を歪ませることによって、上部のNi/Fe積層体全体に印加する。

【0133】この磁化スイッチ素子においては、中央部の複合被制御磁性層に対し、下部の歪み付与層41からの歪みと、上部の固定磁化層45から結合制御層44を介した交換結合 (exchange coupling) とがおよぼされ、複合被制御磁性層はふたつの駆動力の影響下におかれている。協調あるいは競合関係にある複数の駆動力の組合

せは、多数個の素子をマトリクス状に配置した装置において、ひとつの素子だけに選択的に磁化反転を生じさせるランダム・アクセス動作の実現を可能にする手段である。また、2つの入力と同時にONの場合に限り応答するANDゲートのような、各種の論理ゲートを構成する手段にもなっている。

【0134】スウィングバイ・スイッチングでは、被制御磁化ベクトルに対しほぼ垂直方向の駆動力を与えることが重要であることはすでに繰り返し述べた通りである。したがって、固定磁化層45と異方性付与層43のように、積層構造の中に相互に90°をなす磁化容易軸に沿って配置した磁化を持つ組み合わせを利用する場合が多いことも特徴である。

【0135】この磁化スイッチ素子の具体的な構造例を挙げると、歪み付与層41として厚さ150nmのLiNbO<sub>3</sub>薄膜、歪み敏感磁性層42として厚さ20nmのFe-Rh合金膜、異方性付与層43として磁場中堆積で一軸磁気異方性を持たせた厚さ10nmのNi<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>合金薄膜、結合制御層44として第4の実施形態で挙げたものと同様なもの、固定磁性層45としてc軸が面内一方方向に揃って配向した厚さ10nmのCo薄膜を用いたものである。

【0136】この第6の実施形態によれば、第1の実施形態と同様な利点を得ることができるほか、複数個の入力の組合せ状態にしたがった駆動が可能であることにより、論理ゲートの構成や、アドレス機能の実現に適用して好適なものである。

【0137】図10はこの発明の第7の実施形態による磁化スイッチ素子を示す。

【0138】スウィングバイ・スイッチングでは、磁化反転の過程で磁化ベクトルが含まれる面に対して垂直な駆動力を加えるという、3次元的な配置が特徴的である。このため、積層膜の構成要素としてCo/Pt積層膜やTb-Fe合金膜などの垂直磁化膜を含む構造が有用である。

【0139】そこで、この第7の実施形態においては、図10に示すように、静状態で膜面に垂直上向き (+z) または下向き (-z) の磁化方向をとる垂直磁化膜を被制御磁性層51とし、これに対し面内y方向の磁化を持つ固定磁化層52を結合制御層53を介して結合させ、このとき被制御磁性層51が受ける交換相互作用を駆動力として被制御磁性層51の磁化ベクトルをxz面内で回転させることができる。

【0140】また、x軸方向を磁化容易軸とし静状態で面内x方向に磁化ベクトルを持つ被制御磁性層を用い、z方向に磁化された垂直磁化膜を固定磁化層52とし、これと結合させて被制御磁性層51の磁化ベクトルをxy面内で回転させることもできる。

【0141】あるいは、x軸方向を磁化容易軸とする被制御磁性層51に対し、y方向への駆動によって磁化ベ



クトルを $xz$ 面内で回転させる構成において、補助的に設けた垂直磁化膜を被制御磁性層51に結合させることもできる。この場合、垂直磁化膜は、磁化ベクトルが $z$ 方向に立ち上がる際に反磁場から受ける抵抗力を軽減し、 $xz$ 面内の回転が完遂されるのを助ける。

【0142】さらに、垂直方向の応力誘起磁気異方性を駆動力とする第1の実施形態において、被制御磁性層の初期状態の磁化ベクトルを若干膜面から立たせて効果的な駆動を得るために、被制御磁性層に垂直磁化膜を付加、積層して用いることもできる。

【0143】以上のように、(1)被制御磁性層の基本的磁気異方性を定めるものとして、(2)駆動力の源となる固定磁化層などの、磁気異方性や磁化方向を定めるものとして、また(3)被制御磁性層を主とする基本要素に対して素子特性改善のために補助的な影響を与えるものとして、の3通りの目的で垂直磁化膜を利用することができる。

【0144】磁化スイッチ素子の構造の具体例を挙げると、被制御磁性層51として $\text{Co}(0.38\text{nm})/\text{Pt}(0.62\text{nm})$ を10周期積層した多層積層膜、固定磁化層52として $c$ 軸が面内の一方に配向した厚さ25nmの $\text{Co}$ 薄膜、結合制御層53として第4の実施形態で挙げたものと同様なものを用いる。

【0145】なお、結合制御層53を利用せずに、代わりに応力で駆動する場合には、磁歪が垂直磁気異方性に大きな寄与を持っているような材料、例えば $\text{Tb-Fe}$ 合金を被制御磁性層51に用いる。

【0146】この第7の実施形態によれば、第1の実施形態と同様な利点を得ることができる。

【0147】図11はこの発明の第8の実施形態による磁化スイッチ素子を示す。

【0148】磁化ベクトルに対する駆動力には、方向性のものと、軸性のものとがある。すなわち、外部磁場や固定磁化層からの交換バイアス(exchange biasing)は被制御磁化の $N$ 極を決まって一方に駆動するので、方向性の作用と言える。これに対し、例えば応力誘起磁気異方性は、その磁化容易軸の正方向(仮に $+z$ 方向とする)に被制御磁化の $N$ 極が引き寄せられる場合もあれば、逆方向(この場合 $-z$ 方向)に $N$ 極が引き寄せられる場合もある。どちらに $N$ 極が引き寄せられるかは、初期状態に依存する。磁化ベクトルが、平行であれ反平行であれその向きは問わず、とにかく磁化容易軸に沿った形になればよいというものであるので、ここでは軸性の作用と呼ぶことにする。

【0149】さて、磁化ベクトルが、それに対して垂直な磁化容易軸を有する磁気異方性の作用を受けると、

(1)式の中のトルク $M \times H$ が0になって、どちらに $N$ 極が引かれるか分からない状況が出現する。これについては、第4の実施形態においても触れた。磁化ベクトルが熱による揺らぎなどで傾くと初めて、そのときの向き

に応じて、いずれかの方向へと回転させるトルクを受ける。このようにトルクの向きが不定であることは、スウィングバイ・スイッチングで利用される歳差運動の回転の向きも不定であることを意味する。

【0150】素子の動作を、揺らぎに影響されない常に一定の様態に置くためには、上記の状況避ける必要がある。また、磁化反転の速い立ち上がりを得るためにも、トルク $M \times H$ が0になりかねない起動は避けるべきである。

【0151】この目的で、初期状態の磁化ベクトルが磁化容易軸と完全に直交しないようにする工夫は、すでに第1および第3の実施形態においてそれぞれの場合に即して触れた。しかしながら、この第8の実施形態によれば、積層構造を利用することによって、以下のようにさらに汎用性の高い解決法を得ることができる。

【0152】すなわち、図11に示すように、この磁化スイッチ素子は、歪み付与層61、歪み敏感磁性層からなる被制御磁性層62、結合媒介層63および異方性付与層としての固定磁化層64が、順次積層された構造を有する。

【0153】歪み付与層61としては、例えば第3および第6の実施形態で挙げたものを用いることができる。被制御磁性層62としては、例えば第1、第3および第6の実施形態で挙げたものを用いることができる。結合媒介層63としては、例えば第4、第6および第7の実施形態で挙げたものを用いることができる。固定磁化層64としては、例えば第7の実施形態で挙げた垂直磁化膜を用いることができる。

【0154】この磁化スイッチ素子においては、磁歪の大きな歪み敏感磁性層からなる被制御磁性層62の磁化ベクトルは、歪み付与層61からの面内一様歪みを受け、 $z$ 方向に生じる磁化容易軸によって駆動される。被制御磁性層62は磁化容易軸を $x$ 軸に平行に持つが、静状態でのその磁化は、結合媒介層63を介して弱く結合した固定磁化層64からの交換バイアス(exchange biasing)によって若干上向きに落ち着いている。こうして角度を調節したおかげで、起動時のトルク $M \times H$ が必ず決まった向きを持つようにすることができる。

【0155】固定磁化層64と被制御磁性層62との界面で適当な結合が得られるならば、結合媒介層63を省略してもかまわない。また、固定磁化層64の代わりに垂直磁気異方性を与える異方性付与層を被制御磁性層62に強く結合させ、静状態では $x$ 軸からやや上向きに2層両方の磁化があり、被駆動時も両層の磁化が平行を保ち揃って運動するような形式を採用することもできる。

【0156】このような角度関係の調節のために組み合わせられる磁性層は、上述のように垂直磁化膜に限られず、面内磁化膜であってもよい。また、より一般的には、面外に傾いた方向に、磁化容易軸あるいは固定した磁化を持つような磁性薄膜を利用することができる。

【0157】上記の磁化傾角の値について詳細に説明する。

【0158】薄膜面に対し垂直方向にスイッチング駆動のトルクを受ける磁化ベクトルが、初期状態において磁性薄膜の上半空間を指しているようにするために必要な磁気異方性の組み合わせは、次のようになる。

【0159】まず、垂直磁気異方性  $K_p$  (perpendicular anisotropy constant) を持つ磁性膜において、磁化ベクトルが膜面から仰角  $\psi$  の方向を向いたときのエネルギー  $E(\psi)$  は、

$$E(\psi) = v \cdot (2\pi M_s^2 - K_p) \cdot \sin^2 \psi$$

である。ここに  $v$  は磁性薄膜の体積である。 $(2\pi M_s^2 - K_p)$  が正ならば極小エネルギーの安定位置は  $\psi = 0$  の面内方向となり、 $(2\pi M_s^2 - K_p)$  が負ならば垂直磁化膜となる。

【0160】面内磁化膜の磁化ベクトルは、薄膜面の上下に熱揺らぎをし、そのエネルギーは  $kT$  程度 (ただし、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度) である。熱揺らぎの最大振幅よりも大きな傾角を与えておけば、磁化ベクトルを薄膜面の片側に止めることができる。これに必要な傾角の値は次のように見積もることができる。 $kT$  のエネルギーで振れることのできる最大角度を  $\psi_{\max}$  と書くと、ほぼ

$$kT = v \cdot (2\pi M_s^2 - K_p) \cdot \sin^2 \psi_{\max}$$

である。したがって、

$$\psi_{\max} = \sin^{-1} \{ [kT / v \cdot (2\pi M_s^2 - K_p)]^{1/2} \}$$

程度以上の傾角を与えればよい。

【0161】垂直磁気異方性  $K_p$  が形状異方性  $2\pi M_s^2$  に比べて無視できるような  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  合金を例にとってこの大きさを見積もると、温度  $300\text{K}$  で、飽和磁束密度  $M_s = 10^4$  (G) の  $\text{Ni-Fe}$  合金、寸法  $100\text{nm} \times 50\text{nm} \times 10\text{nm}$  のパターンについて、熱揺らぎによる面外への振れ角は  $0.83^\circ$  となる。パターンの寸法が  $50\text{nm} \times 25\text{nm} \times 5\text{nm}$  に小さくなっても、この振れ角は  $2.4^\circ$  なので、 $5^\circ$  もずらせれば十分と考えられる。

【0162】 $K_p$  が小さく面内磁化膜であるような被制御磁性層 62 に上で求めたような傾角を与えるために、 $K_p$  が大きな垂直磁化膜を結合させることができる。2 層の強磁性層を積層すると、普通、両者の磁化方向が平行な場合にエネルギーが下がるような交換エネルギー (exchange energy)  $E_{ex}$  が働き、両者の磁化方向は揃う傾向を生じる。

$$E_{ex} = J_{ex} \cdot \cos(\psi_1 - \psi_2)$$

ここに、 $J_{ex}$  は 2 層間の交換定数、 $\psi_1$  と  $\psi_2$  はそれぞれの層の磁化の仰角である。

【0164】ところで、 $J_{ex}$  が極めて大きい場合には  $\psi_1$  と  $\psi_2$  はほとんど一致し、両層合わせたエネルギーは再び  $E(\psi) = v \cdot (2\pi M_s^2 - K_p) \cdot \sin^2 \psi$

の形の仰角への依存を持つようになってしまうので、エネルギーの極小は面内または垂直方向に限られる。そこで、垂直でも面内でもないような傾角を与えるには、 $\psi_1$  と  $\psi_2$  とが完全には一致しないように、適度に弱い  $J_{ex}$  を選ぶことが必要である。

【0165】 $J_{ex}$  を弱めることは、二つの強磁性層の結合を弱めるわけであるから、これは次のような手段で実現することができる。例えば、両層を直接完全に接触させずに、間に結合媒介層 63 をはさみ、これによって結合の強さを調節することである。結合媒介層 63 として、具体的には例えば、界面に 1 原子層以下の被覆率で  $\text{Ti}$  や  $\text{Cu}$  などの非磁性の金属をはさむことで交換結合を弱めることができる。また、真空容器中で両層を逐次積層する間に、一時酸素を導入して界面付近を酸化させることによっても達成することができる。

【0166】固定磁化層 64 には、磁気異方性の大きな材料、例えば  $c$  軸が面内の一方に配向した  $\text{Co}$  薄膜や、外場に影響されにくい反強磁性体 ( $\text{NiMn}$ 、 $\text{FeMn}$ 、 $\text{NiO}$  など) を用いることができる。

【0167】この発明の第 8 の実施形態によれば、第 1 の実施形態と同様な利点を得ることができる。

【0168】図 12 はこの発明の第 9 の実施形態による磁気記憶装置を示す。この磁気記憶装置は、磁化スイッチ素子からなるメモリセルとホール効果によるメモリセルの情報読み出し手段とを組合せたものである。

【0169】ホール効果 (Hall effect) を利用して被制御磁性層の磁化方向を電気信号に変換し、磁化状態を素子の外部から読み出すことができる。被制御磁性層の正逆の磁化方向を「0」または「1」の状態に対応させると、スウィングバイ・スイッチングによりメモリセルに情報を書き込み、ホール効果によってメモリセルから情報を読み出す 2 値の磁気記憶・再生装置を得ることができる。

【0170】図 12 に示すように、この磁気記憶装置においては、基板 71 上に全体として円柱形状を有する磁化スイッチ素子 72 が形成されている。この磁化スイッチ素子 72 はメモリセルを構成する。基板 71 上には、この磁化スイッチ素子 72 を中心とする十字型パターンがこの磁化スイッチ素子 72 と接触して形成されている。この十字型パターンのうち一方の方向のパターンは、下部配線 73 と絶縁層 74 と上部配線 75 とが順次積層された構造を有し、これと直交する方向のパターンは絶縁層 76 と配線 77 とが順次積層された構造を有する。

【0171】磁化スイッチ素子 72 の最上層は強磁性体の垂直磁化膜からなる被制御磁性層 72a により構成されている。この被制御磁性層 72a はホール素子を兼用するものである。この被制御磁性層 72a は、それと積層された別の層 (例えば、応力を与える圧電体層や、交換相互作用を ON/OFF する結合制御層など) からの駆動力ないし影響を受けて、スウィングバイ・スイッチ

ングを行う。より具体的には、この磁化スイッチ素子72は、第1の実施形態による磁化スイッチ素子における歪み敏感磁性薄膜3として垂直磁化膜を用いたものや、第7の実施形態による磁化スイッチ素子と同様なものである。なお、下部配線73は、例えば磁化スイッチ素子72の最下層に設けられる電極層と接続される。

【0172】垂直磁気異方性の大きなホール素子兼用被制御磁性層72aとしては、例えばCo(0.38nm)/Pt(0.62nm)を10周期積層した多層積層膜を用いることができる。

【0173】この磁気記憶装置においては、磁化スイッチ素子72の周りに設けられた配線76の電流供給端子A、A'間に電流を通じると、その電流および被制御磁性層72aの磁化方向(膜面に対し立っている)のどちらとも垂直な方向のホール電圧測定端子B、B'間にホール電圧が生じ、このホール電圧を検出することにより磁化スイッチ素子72からなるメモリセルの情報を読み出すことができる。自発磁化(spontaneous magnetization)を持つ強磁性体(ferromagnet)は、その磁化に比例し比較的大きな値を持つ異常ホール効果(anomalous Hall effect)を示すので、大きな読み出し信号を得るのに好都合である。

【0174】なお、ホール効果素子との組合せは、例えば面内に磁化方向を持つ被制御磁性層の場合には、Hybrid Hall effect device(Mark Johnson, B.Bennet, M.Yang, M. Miller, and B.Shanabrook, Appl.Phys.Lett.71,974(1997))に倣うことができる。すなわち、記憶担体である被制御磁性層の片側端部から面と垂直方向へ広がる磁束を、基板面内の十字形半導体パターンで受けるような構造を作ればよい。

【0175】以上のように、この第9の実施形態によれば、ホール効果により情報の読み出しが可能な磁気記憶装置を実現することができる。また、被制御磁性層72aとホール素子とを兼用しているので、素子全体の構成要素数を減らすことができ、磁気記憶装置の製造工程の簡素化および信頼性の向上を図ることかできる。

【0176】図13はこの発明の第10の実施形態による磁気記憶装置を示す。この磁気記憶装置は、磁化スイッチ素子からなるメモリセルと磁気抵抗効果(magnetoresistance effect)によるメモリセルの情報読み出し手段とを組合せたものである。

【0177】図13に示すように、この磁気記憶装置においては、圧電体層81上に歪み敏感磁性層からなる被制御磁性層82、非磁性中間層83および固定磁化層84が順次積層されている。圧電体層81の下面には下部電極85が設けられている。これらにより磁化スイッチ素子が構成されている。被制御磁性層82の磁化ベクトルは、圧電体層81からの歪みを受けて駆動される。被制御磁性層82と固定磁化層84とが非磁性中間層83ではさまれた構造により磁気抵抗素子が構成されてい

る。

【0178】下部電極85は入力スイッチおよび電源を介して接地されている。また、被制御磁性層82も接地されている。磁気抵抗素子の両端子、すなわち被制御磁性層82と固定磁化層84との間には出力回路が接続されている。

【0179】磁気抵抗素子の非磁性中間層83に薄い絶縁体を用い、トンネル電流の変化を検出する方式はトンネルMR素子と呼ばれる。これに対し、被制御磁性層82、非磁性中間層83および固定磁化層84の3層とも金属で、この積層膜の面内方向の電流の変化を検出する場合は、スピンバルブ型GMR(giant magneto-resistance)素子と呼ぶ。いずれの場合も、ふたつの磁性層の磁化が平行の場合に抵抗が低く、反平行の場合に抵抗が高くなる性質があり、これによって被制御磁性層の磁化方向を出力回路より電気信号として取り出すことができ、磁化スイッチ素子からなるメモリセルの情報を読み出すことができる。

【0180】磁気抵抗素子の具体例を挙げると、トンネルMR素子の場合、固定磁化層84として厚さ10nmのCo膜、非磁性中間層83として厚さ2nmのAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜、歪み敏感磁性層からなる被制御磁性層82として厚さ5nmのFe-Rh合金膜を用いたものである。ただし、これらのCo膜およびFe-Rh合金膜とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜との界面に厚さ1.2nmのFe膜が付加されている。このFe膜の付加は、MR比を高めるためである。スピンバルブ型GMR素子の場合、HDD用スピンバルブ・ヘッドによく用いられるCo/Cu/Coを磁歪の大きな被制御層82に結合させたものなどである。

【0181】以上のように、この第10の実施形態によれば、磁気抵抗効果により情報の読み出しが可能な磁気記憶装置を実現することができる。また、磁化スイッチ素子を構成する層を磁気抵抗素子に利用することにより磁気抵抗素子を複合化しているので、素子全体の構成要素数を減らすことができ、磁気記憶装置の製造工程の簡素化および信頼性の向上を図ることかできる。

【0182】次に、この発明の第11の実施形態による磁気記憶装置について説明する。

【0183】この磁気記憶装置においては、上述の各実施形態のスウィングバイ・スイッチングによる磁化スイッチ素子が同一の基板上にアレイ状に集積化配列され、メモリセルアレイが構成されている。これらのメモリセルアレイには、メモリセルを選択するための語線および桁線が設けられる。

【0184】この第11の実施形態によれば、スウィングバイ・スイッチングの磁化スイッチ素子は情報担体となる磁性体寸法が10nm程度に小さくなくても、制動不足に妨げられることなく、1nsレベルの高速磁化反転を達成することができるので、磁気記憶装置の高密度

および大容量化と高速動作化との両方を達成することができる。

【0185】この第11の磁気記憶装置は、コンピュータ用記憶装置のほか、放送用映像プロセッサ、ウェブから高速ダウンロード可能な家庭用映像サーバーなどに応用可能である。また、全固体の堅牢な記憶装置を提供するので、携帯情報端末、携帯ビデオカメラ・レコーダにも適している。

【0186】以上、この発明の実施形態について説明したが、この発明は、上述の実施形態に限定されるものではなく、この発明の技術的思想に基づく各種の変形が可能である。

【0187】すなわち、上述の第1～第11の実施形態において挙げた数値、構造、形状、材料、成長方法、プロセスなどはあくまでも例に過ぎず、必要に応じて、これらと異なる数値、構造、形状、材料、成長方法、プロセスなどを用いることも可能である。

【0188】例えば、第6の実施形態において、必要に応じて、層構造に反強磁性体層を含ませ、それによる交換相互作用により被制御磁性層の磁化が駆動力のないときに決まった方向に向きやすいような交換バイアスを与えるようにしてもよい。この反強磁性体層の材料としては、下記のようなものを用いることができる。

【0189】磁気機能素子の動作温度以上で反強磁性秩序を示す材料は、合金、酸化物、フッ化物など、幅広い範疇の物質を利用することができる。

【0190】Mnは $\gamma$ 相の単体で反強磁性を示し、3d遷移金属や貴金属との合金にしてもかなり幅広い組成範囲で反強磁性を示すので、本発明に適する合金の構成元素である。特に、Mn組成が40at.%以上で良好な特性が得られる。

【0191】フッ化物の反強磁性体の例として、 $\text{FeF}_2$ や $\text{MnF}_2$ 、 $\text{K}_2\text{NiF}_4$ などがある。室温よりも低い温度で反強磁性秩序を失う物質もあるが、別種の、高温まで反強磁性が持続する物質と組み合わせて利用することができる。

【0192】また、この発明に適する反強磁性体に類似の性質（磁化が小さく磁気異方性が大きい）を持つ材料として、補償組成（compensation composition）に近い組成のフェリ磁性体（ferrimagnetic materials）も利用することができる。例えば、 $\text{Tb-Cr}$ 合金などの、貴土類と遷移金属との合金が候補になる。

【0193】耐食性に優れた反強磁性材料、機能装置に一般に要求される特性として、使用しない保存環境中で腐食しないことが挙げられる。この発明の材

料も、この要求に沿った材料を選択するのが望ましい。

【0194】酸化物反強磁性体は金属に比べて耐食性に優れる。磁気記録装置の動作環境である室温以上で反強磁性秩序を示す酸化物としてNiOが代表的である。 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ も室温で反強磁性を示す。NiOを主として、別の物質を添加した固溶体（solid solution）で、特性の調整を行うこともできる。例えば、その温度以上で反強磁性秩序を失うネール温度 $T_N$ が548K付近にあるNiOと、ネール温度は93Kと室温以下であるがNiOよりも磁気異方性が大きな $\text{CoO}$ との固溶体を作ることにより、室温でNiOよりも磁気異方性が大きな材料を得る方法がその例にあたる。NiOと $\text{CoO}$ とを積層形成した反強磁性体も、同じ目的で利用することができる。

【0195】また、金属であっても、次のような貴金属の合金では耐食性が改善される場合が多い。材料系： $\text{Ir-Mn}$ 、 $\text{Pt-Mn}$ 、 $\text{Pd-Pt-Mn}$ 、 $\text{Rh-Mn}$ 、 $\text{Pt-Cr-Mn}$ など。

【0196】耐熱性に優れた反強磁性材料（高 $T_N$ 材料）。

構成要素として用いられる反強磁性体は、室温ではもちろん温度の上昇した環境でも、反強磁性磁気秩序を保ち、強磁性体の磁化との結合を保つものであることが望ましい。特に、回路の発熱によって装置内で局所的には環境の温度よりもはるかに高い温度になっている可能性がある。これに抗して動作を保証するためにも、耐熱性の高い反強磁性材料が必要である。

【0197】反強磁性材料がその温度以上で反強磁性秩序を失う臨界温度をネール温度といい、 $T_N$ と書く。また、接触する強磁性体の磁化への拘束力を示す最高温度をブロッキング温度といい、 $T_B$ と書く。

【0198】熱安定性の見地から、この発明に利用する反強磁性体は高い $T_B$ のものが望ましい。 $T_B$ は $T_N$ よりかなり低いのが普通であるが、おおむね $T_N$ が高い材料ほど $T_B$ も高い傾向がある。 $T_B$ が高いことが知られている材料を以下に列挙する。 $T_N$ が高いこれらの材料は、材料の構成元素が規則的に配列して規則結晶を組むことで反強磁性を生じているものが多く、ある温度 $T_{\text{anneal}}$ 以上で熱処理を行わないと規則化が起きない。これは製造上の制約となり得るが、300℃以下の処理温度で済む場合には、媒体薄膜堆積時に普通行われる基板加熱で到達することができ、とりわけ障害とはならない。

【0199】

材料名	$T_B$ (°C)	$T_N$ (°C)	$T_{\text{anneal}}$ (°C)
Ni-Mn	450	797	280
Pt-Mn	380	702	280
Pt-Cr-Mn	380		
Pd-Pt-Mn	300		230

### 作製の容易な反強磁性材料

無秩序合金で反強磁性が得られる材料は熱処理や高温までの基板加熱の必要がなく、スパッタリングなどの薄膜作製プロセスで容易に反強磁性薄膜を得ることができるので、生産に適している。

【0200】組成系：Fe-Mn、Ir-Mn、Rh-Mn、Ru-Mn、Pt-Cr-Mn、Cr-Alなど。

【0201】

【発明の効果】以上説明したように、この発明による磁化駆動方法によれば、磁気異方性や交換相互作用などの各種の起源により発生される駆動力によりスウィングバイ・スイッチングを行うので、磁性体の寸法がサブミクロン領域、さらにはディープサブミクロン領域に微細化されても、高速でスウィングバイ・スイッチングを行うことができる。

【0202】また、この発明による磁気機能素子によれば、磁気異方性や交換相互作用などの各種の起源により発生される駆動力によりスウィングバイ・スイッチングを行うので、情報担体の寸法がサブミクロン領域、さらにはディープサブミクロン領域に微細化されても、高速でスウィングバイ・スイッチングを行うことができる。

【0203】また、この発明による磁気装置によれば、そのような磁気記憶素子とホール効果または磁気抵抗効果を利用した読み出し手段とを有することにより、高速で情報の書き込みを行うことができ、しかも情報の読み出しが可能な磁気記憶装置などの磁気装置を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】磁場中での磁化ベクトルの歳差運動と緩和を説明するための略線図である。

【図2】垂直磁気異方性に駆動される磁化ベクトルの軌跡を計算で求めた結果を示す略線である。

【図3】面内の磁化容易軸に平行な磁場に駆動される磁化ベクトルの軌跡を計算で求めた結果を示す略線である。

【図4】この発明の第1の実施形態による磁化スイッチ素子を示す略線図である。

【図5】この発明の第1の実施形態による磁化スイッチ素子において垂直磁気異方性に駆動される磁化ベクトルの運動の様子を示す略線図である。

【図6】この発明の第3の実施形態による磁化スイッチ素子を示す略線図である。

【図7】この発明の第4の実施形態による磁化スイッチ素子を示す略線図である。

【図8】この発明の第5の実施形態によるMRAMを示す略線図である。

【図9】この発明の第6の実施形態による磁化スイッチ素子を示す略線図である。

【図10】この発明の第7の実施形態による磁化スイッチ素子を示す略線図である。

【図11】この発明の第8の実施形態による磁化スイッチ素子を示す略線図である。

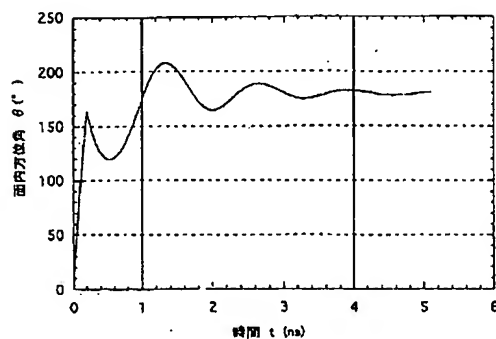
【図12】この発明の第9の実施形態による磁気記憶装置を示す略線図である。

【図13】この発明の第10の実施形態による磁気記憶装置を示す略線図である。

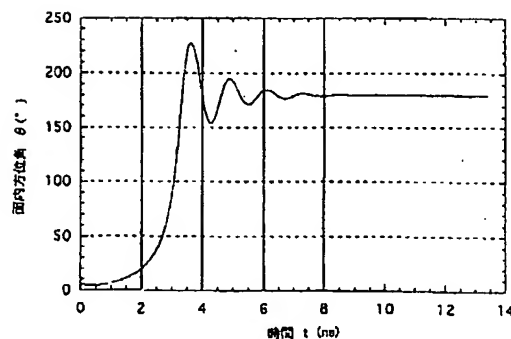
【符号の説明】

2、81・・・圧電体層、3、11・・・歪み敏感磁性薄膜、12、41、61・・・歪み付与層、21、45、52、64、84・・・固定磁化層、22、51、62、72a、82・・・被制御磁性層、23・・・中間層、42・・・歪み敏感磁性層、43・・・異方性付与層、53・・・結合制御層、63・・・結合媒介層、72・・・磁化スイッチ素子、83・・・非磁性中間層

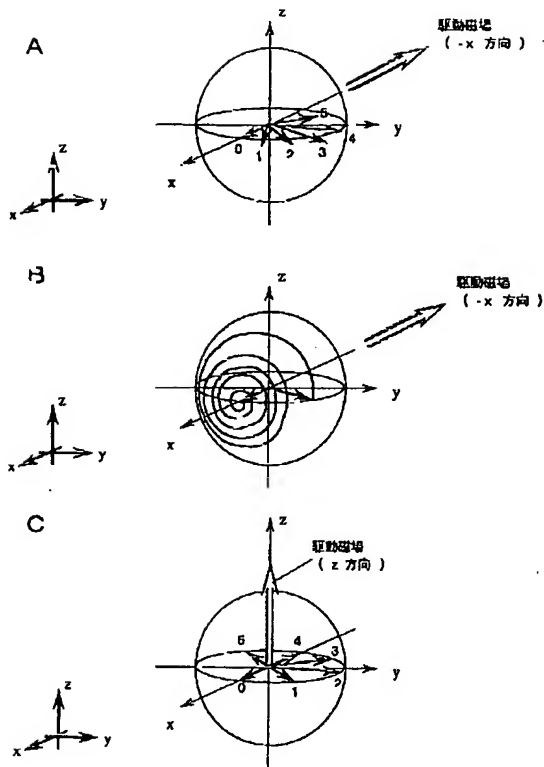
【図2】



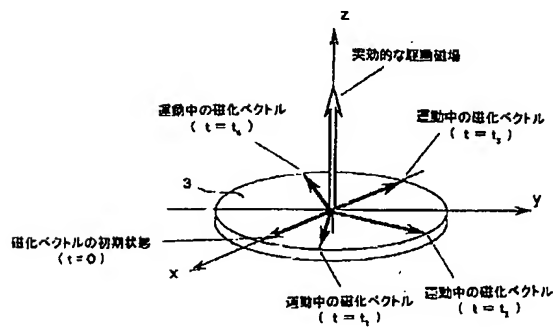
【図3】



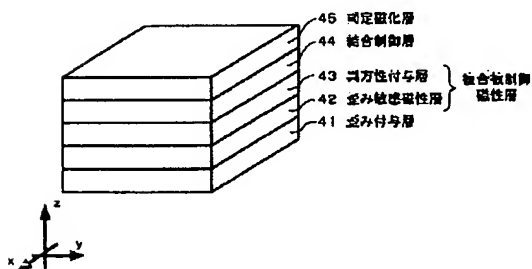
【図1】



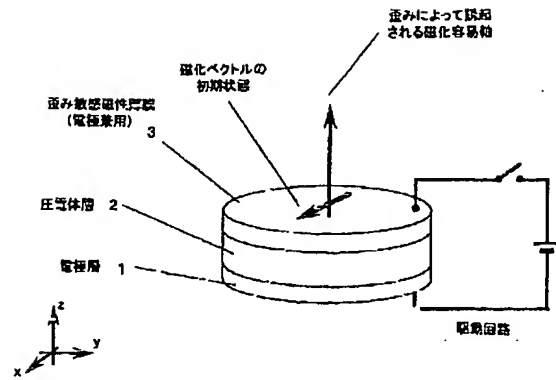
【図5】



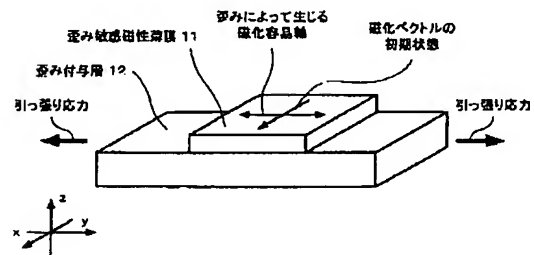
【図9】



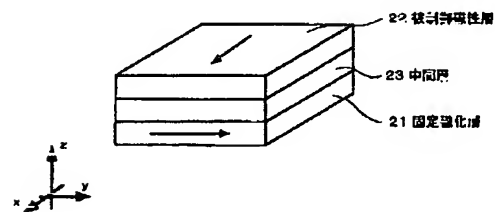
【図4】



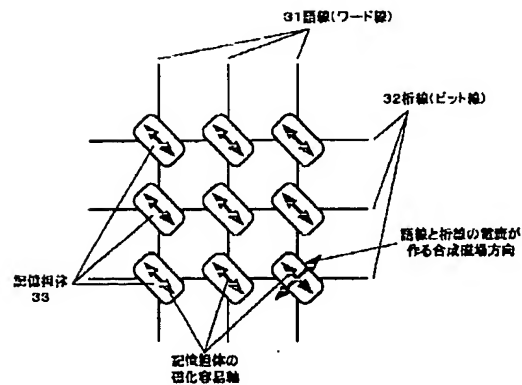
【図6】



【図7】

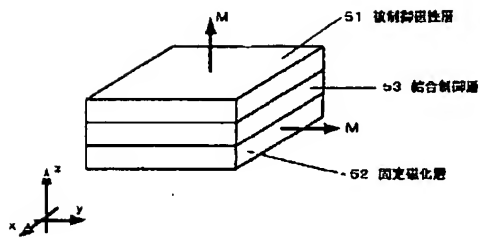


【図8】

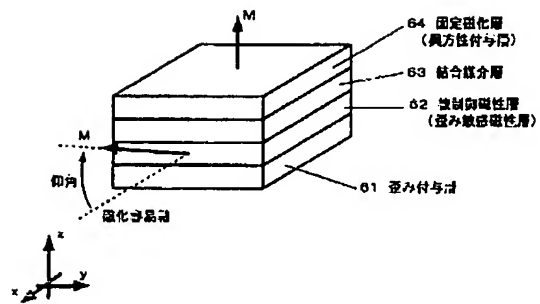




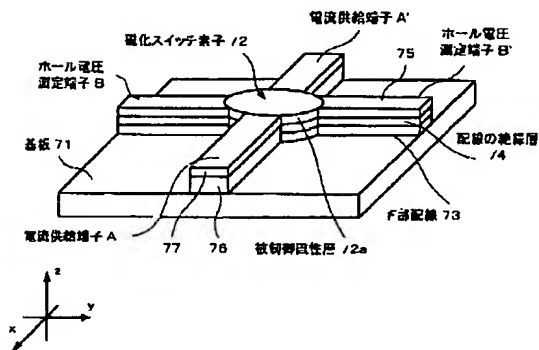
【図10】



【図11】



【図12】



【図13】

